

# 近接場光の増幅、検出器の高感度化についての調査研究

野田 純也\*

## [要 旨]

近接場光（表面プラズモン）の発生効率を高めるため近接場光の高効率化・伝搬距離の依存条件について調査した。近接場光発生構造である金属回折格子の解析モデルについて数値解析し、電界強度増強を確認した。また、近接場光の応用可能分野の最近の動向調査の結果から昨今のエネルギー問題を踏まえ、太陽電池への応用及び高効率化についての考察等を行い、シリコン系及びCIS/CIGS系薄膜太陽電池に応用可能であることがわかった。

## 1 はじめに

ナノ技術の進展が各応用分野で進められている中、近接場光に関する研究が多く報告されている。数値解析法のハードウェアの発達による計算速度の向上やナノ微細構造作製技術も発達し複雑な構造も理論、作製ともに可能な時代となってきた。また、昨今のエネルギー問題を踏まえ、自然・エコエネルギーの普及の期待が高まっている中で、太陽電池の低コスト化につながる変換効率の高効率化が進められている。

近接場光の局所的ではあるが高増強度の光の発生が可能である特長を太陽電池やそのほか光電変換素子に応用し変換効率の高効率化を図りたい。そのために近接場光の発生効率の高効率化の微細構造や依存条件について調査し、太陽電池に応用可能な金属回折格子について数値解析した。また太陽電池への応用及び高効率化についての考察等を行った。

## 2 近接場光

### 2.1 近接場光の発生

図1に示すように誘電体や金属のような微小物に光を照射すると物質表面から光の波長に比べて

十分近い位置に自由電子が集团的に集中する。自由電子は振動を起し+電荷と-電荷に対称的に発生する。微小物質間同士でその+、-の電気的作用（電気双極子）により局所的な強度の強い光が発生する。これは物質の表面に存在し近接場光という。

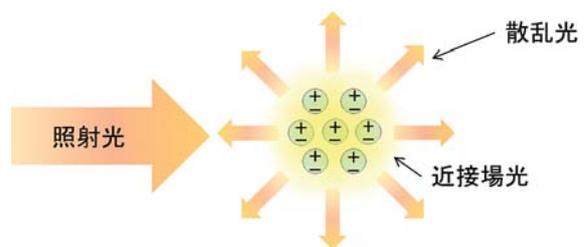


図1 近接場光（局在型プラズモン共鳴）

### 2.2 表面プラズモンについて

物質の表面に存在するプラズマ振動を表面プラズモン、その物質の性質（誘電率等）の共鳴条件と一致した波長の光を入射したとき発生する光を表面プラズモン共鳴という。誘電率が非常に大きい場合かつ周辺媒質の誘電率が小さい場合、この光は伝搬光であり、さらに物質表面に非伝搬の近接場光を発生する。図1の微粒子に発生する表面プラズモンを局在型表面プラズモン、図2の回折格子やホールアレイなどの周期構造で発生する表面プラズモンを伝搬型表面プラズモンという。

\*応用技術課 技師

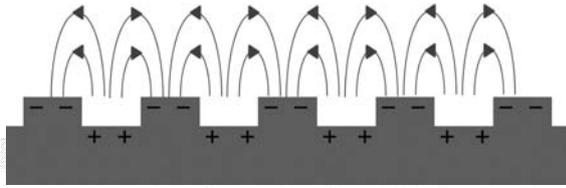


図2 伝搬型プラズモン共鳴

### 2. 3 表面プラズモンの自由空間伝搬光との合波

近接場光は非伝搬光であるが、自由空間を伝搬する光と合波し伝搬光となる(図3参照)。その条件は伝搬光と重なることが前提であり、角周波数(エネルギー)と波数(運動量)が一致することである。

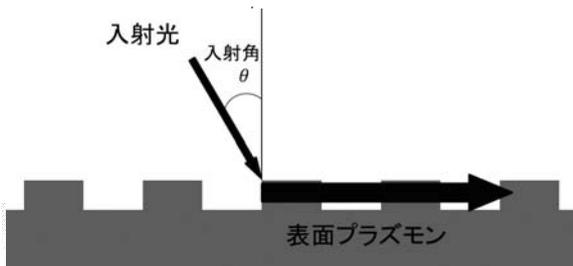


図3 回折格子による表面プラズモンとの結合

### 2. 4 近接場光の高効率化の依存条件

近接場光発生効率・伝搬距離の依存条件は物質の構造や性質の条件により増強度や伝搬距離が増加する。構造は回折格子、ホールアレイなどの周期構造、微粒子、ロッド状など主に数種類の構造があるが、共通する条件として、構造のサイズ、形状、誘電率等の材料定数の影響を受ける。

例として金属回折格子などの周期構造では周期の横方向の比、深さ方向の対称比など、球状などの微粒子ではアスペクト比、微粒子間距離などに依存する。これはナノギャップが小さくなるほど強度は大きくなる。

周期構造銀薄膜(膜厚 45nm)で発生効率は4~19倍、伝搬距離:50nm、また微粒子構造では

発生構造で9~16倍、伝搬距離は半径100nmの場合50nm(TE<sub>10</sub>モード)、半径40nmの場合20nm(TE<sub>20</sub>モード)という事例がある。微粒子半径の約半分の伝搬距離とすることが確認されている。

金属の誘電率は分散媒質でよく扱うドローデの自由電子モデルに従うため、ほとんどの場合屈折率の周波数依存性を考慮しなくてはならない。ドローデ分散の式は次のとおりである。

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty(\omega) - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\nu_c\omega} = 1 + \chi(\omega) \quad (1)$$

$\epsilon_r(\omega)$ : 複素比誘電率

$\epsilon_\infty(\omega)$ : 複素比誘電率の実部

$\chi(\omega)$ : 電気比感受率

$\omega_p$ : プラズマ角周波数

$\nu_c$ : 衝突周波数 ( $\nu_c = \frac{\epsilon_0\omega_p^2}{\sigma}$ )

### 3 数値解析(金属回折格子モデル)

近接場光の発生効率の理論数値解析として時間領域差分法(FDTD法)により図4に示す金属回折格子モデルを解析した。銀(Ag)との空気界面で可視領域の中では比較的高い増強度である波長750nmのP偏光平面波を入射し電界が構造まで伝搬し定常状態まで時間が経過したときの電界強度の発生効率を解析した。銀の誘電率の設定はドローデ分散を用いて電界増強度の解析を行っている。

図5に電界増強度の解析結果、図6に回折格子先端付近での増強度を示す。局所的だが最大約6倍に増強度が高まる。回折格子内50nm付近で発生効率が高まっていることが確認できた。

この結果より近接場光の発生効率をより高めるためには回折格子の水平方向周期をさらに極小化して効率を高め、近接場光の発生箇所を多くすることが必要と考察する。ただし、ナノ微細構造を形

成する手法で EBL 法などの微細作製装置のコストが高いため、検討を要する。

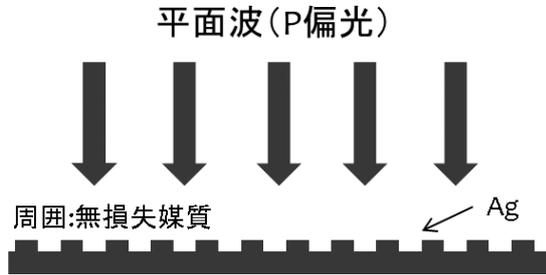


図4 銀回折格子解析モデル

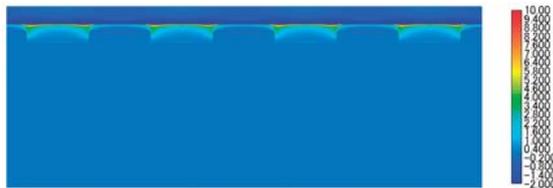


図5 電界増強度 (等高線表示)

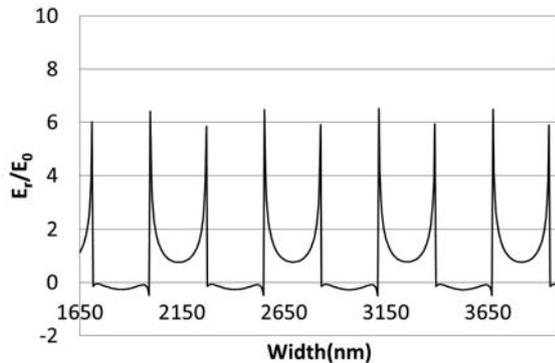


図6 回折格子先端付近の電界増強度

#### 4 近接場光の応用 —太陽電池について—

近接場光に応用できる分野で光電変換素子として太陽電池があるが、近接場光の発生構造として適用できるものは微粒子やホールアレイなどが主である。太陽電池の照射面上に作製しその光が光吸収層に伝搬することが必須である。近接場光の伝搬距離の特性上太陽電池の構造は薄膜化することが必要であるが、光吸収層の感度特性や各層の光透過特性、高速性に課題がある。表1に太陽電

池の種類と現状の変換効率<sup>6)</sup>を示す。量産品のシリコン系は大面積モジュールの変換効率が高いが低欠陥密度のウェハが必要なためコストが高い。薄膜系は結晶系の膜厚が薄くできることや大面積化が可能でコストを低く抑えられる。その中でも CIS/CIGS (カルコパイライト) 系は高い変換効率を得られている。近接場光を応用していくには量産品のシリコン系または低コストの太陽電池では高効率である CIS/CIGS 系で薄膜化ができるという観点から応用が見込めるのではないかと考察している。

表1 主な太陽電池の変換効率

	材 料	セル 変換効率(%)	モジュール 変換効率(%)	コスト
バルク 結晶系	単結晶Si	25.0	22.9	高
	多結晶Si	20.4	15.5	高
	単結晶GaAs	26.4	-	高
薄膜系	a-Si	10.1	6.3	低
	a-Si/ $\mu$ c-Si	11.7	8.3	低
	a-Si/a-Si/a-SiGe	12.1	10.4	低
	CdTe	16.7	10.9	低
	Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub>	20.1	13.8	低
	色素増感型	11.2	9.2	低
	有機薄膜系	7.9	3.5	低

#### 5 近接場光高効率化とその応用 —最近の研究事例—

最近の研究事例として、プラズモンの増強として金 (Au) 構造間距離の制御に関する数値解析で 102~104 倍程度の増強が誘起されることが示され、構造間距離が小さいほど強度が高くなるという報告がある。<sup>8)</sup>色素増感太陽電池では光吸収色素に銀微粒子を吸着させエネルギー変換効率を 2.5% 上昇させたという報告<sup>9)</sup> や有機系薄膜太陽電池で金属ナノ粒子により効率上昇などの研究報告<sup>10)</sup> もある。光電変換素子については Si ナノフォトダイオードにプラズモンアンテナを形成し出力電流が数十倍に増強され、高速かつ低電圧動作が可能という報告<sup>11)</sup> がされている。

## 6 まとめ

近接場光の発生効率、伝搬距離の依存条件について調査し入射波長や構造の諸条件により変化することがわかった。数値解析は銀金属回折格子モデルについて解析を行い、最大約6倍の増強度、回折格子部分の伝搬を確認でき、近接場光発生高効率化の条件を検討する手がかりとすることができた。

近接場光の太陽電池への応用としてシリコン系・CIS/CIGS系・色素増感太陽電池で応用が可能であり、近接場光の特性上太陽電池の薄膜化が望ましいと考えられる。

今後の予定として、近接場光の発生効率の高効率化を目標に構造の選定、諸条件の最適化を行い、解析を通して理論的検証を得ていきたい。

また太陽電池や光電変換素子への応用を念頭に主に太陽電池の構造に近接場光の構造を適用し変換効率の向上を目指し光電変換デバイスの発展に寄与できるようにしていきたい。

## (参考文献)

- 1) 岡本隆之、梶川浩太郎：プラズモニクスー基礎と応用、講談社(2010)
- 2) 山田淳：プラズモン材料の開発と応用、シーエムシー出版(2006)
- 3) 大津元一、小林潔：近接場光の基礎ーナノテクノロジーのための新光学ー、オーム社(2003)
- 4) 福井萬寿夫、大津元一：光ナノテクノロジーの基礎、オーム社(2003)
- 5) 濱川圭弘：太陽電池、コロナ社(2004)
- 6) 中田時夫：CIGS 太陽電池の基礎技術、日刊工業新聞社(2010)
- 7) 松島潔：金属微粒子による散乱光 FDTD 解析と SNOM 応用の研究、立命館大学修士論文 p23-p29, p57-p102 (2006)
- 8) 原口雅宣、福井萬寿夫、岡本敏弘：プラズモン・デバイスの現状と将来展望、光学、第40巻2号、p68-p76(2011)
- 9) 伊原学：プラズモン太陽電池ー局在表面プラズモンによる色素増感太陽電池の高効率化ー、光学、第40巻2号、p91-p97(2011)
- 10) 上野貢生、三澤弘明：プラズモン増強場の形成と光反応、光学、第40巻2号、p448-p455(2011)
- 11) 藤方潤一、大橋啓之、最上徹：表面プラズモンアンテナを利用した Si ナノフォトダイオード、光学、第40巻2号、p98-p103(2011)